



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 106659449 B

(45) 授权公告日 2020.11.24

(21) 申请号 201580043288.3

(22) 申请日 2015.08.04

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 106659449 A

(43) 申请公布日 2017.05.10

(30) 优先权数据
14180751.1 2014.08.13 EP

(85) PCT国际申请进入国家阶段日
2017.02.13

(86) PCT国际申请的申请数据
PCT/EP2015/067864 2015.08.04

(87) PCT国际申请的公布数据
W02016/023782 EN 2016.02.18

(73) 专利权人 皇家飞利浦有限公司
地址 荷兰艾恩德霍芬

(72) 发明人 T·克勒 B·J·布伦德尔

(74) 专利代理机构 永新专利商标代理有限公司
72002

代理人 王英 刘炳胜

(51) Int.Cl.
A61B 6/00 (2006.01)
A61B 6/03 (2006.01)
G01N 23/046 (2018.01)

(56) 对比文件
WO 2014103269 A1, 2014.07.03
CN 102360498 A, 2012.02.22
US 2014169522 A1, 2014.06.19

审查员 宋含

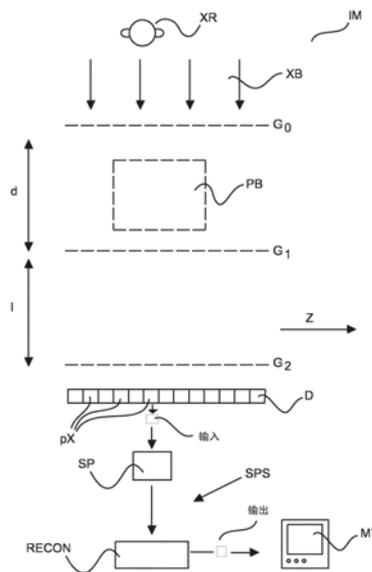
权利要求书1页 说明书11页 附图5页

(54) 发明名称

断层摄影中的定量暗场成像

(57) 摘要

一种信号处理装置和一种相关的方法。具体地,所述装置包括新颖的图像重建器以根据干涉投影数据(m)来重建样本的横截面图像。所述重建器(RECON)是基于新的前向模型的,所述新的前向模型考虑相衬信号到暗场信号中的串扰。



1. 一种图像信号处理装置 (SPS), 包括:

输入端口 (IN), 其用于接收干涉测量数据 (m), 所述干涉测量数据是响应于在投射X射线射束通过要被成像的样本之后所述射束入射在探测器上而在所述探测器处探测到的, 所述数据包括相衬信号和暗场信号;

重建器 (RECON), 其被配置为运行图像重建算法以至少将所述暗场信号重建成暗场图像 ϵ , 其中, 所述重建算法是基于前向模型的, 所述前向模型并入了被配置为捕获所述相衬信号到所述暗场信号中的串扰的串扰模型分量;

输出端口 (OUT), 其用于输出至少所重建的暗场图像 ϵ 。

2. 根据权利要求1所述的装置, 其中, 所述前向模型是从以下的组合形成的复合前向模型: i) 针对差分相衬信号的专用前向模型; 和 ii) 针对所述暗场信号的专用前向模型。

3. 根据权利要求2所述的装置, 其中, 所述串扰模型分量与针对所述差分相衬信号的所述专用前向模型的空间偏导数的绝对值成比例或与所述专用前向模型的绝对值成比例。

4. 根据权利要求1所述的装置, 其中, 所述前向模型是针对所述相衬信号和所述暗场信号两者的公共前向模型。

5. 根据权利要求4所述的装置, 其中, 所述公共前向模型包括针对所述相衬信号的模型分量和针对所述暗场信号的模型分量, 其中, 所述串扰模型分量与针对所述相衬信号的所述模型分量的空间偏导数的绝对值成比例。

6. 根据权利要求1-5中的任一项所述的装置, 其中, 所述重建算法是迭代的。

7. 根据权利要求6所述的装置, 其中, 所述重建算法的迭代是由目标函数的优化驱动的。

8. 根据权利要求7所述的装置, 其中, 所述目标函数包括关于所述前向模型的余量。

9. 根据权利要求1-5中的任一项所述的装置, 其中, 所述射束的几何形状是平行的或发散的。

10. 一种包括根据权利要求1-9中的任一项所述的装置的干涉X射线成像系统。

11. 一种图像信号处理方法, 包括:

接收 (S505) 干涉测量数据, 所述干涉测量数据是响应于在投射X射线射束通过要被成像的样本 (PB) 之后所述射束入射在探测器上而在所述探测器处探测到的, 所述数据 (m) 包括相衬信号和暗场信号;

至少将所述暗场信号重建 (S510) 成暗场图像 ϵ , 其中, 重建算法是基于前向模型的, 所述前向模型并入了被配置为捕获所述相衬信号到所述暗场信号中的串扰的串扰模型分量;

输出 (S515) 至少所重建的暗场图像 ϵ 。

12. 一种在其上存储有计算机程序的计算机可读介质, 所述计算机程序用于控制根据权利要求1-9中的任一项所述的装置或根据权利要求10所述的系统, 当由处理单元执行时, 所述计算机程序适于执行根据权利要求11所述的方法步骤。

断层摄影中的定量暗场成像

技术领域

[0001] 本发明涉及图像信号处理装置、图像信号处理方法、计算机程序产品以及计算机可读介质。

背景技术

[0002] 差分相衬成像是使用包括光栅的干涉仪来对由人们想要成像的目标引起的相位变化进行成像的成像技术。当处理相衬图像数据时,出现了当前吸引研究团体的注意力的另一信号。这就是涉及由电磁波在其通过被成像目标时经受的相干性损失的暗场信号。然而,已经观察到暗场图像(如能根据这样的暗场信号以断层摄影的方式进行重建)有时候会遭受伪影。

发明内容

[0003] 因此可能存在对于用于改进暗场图像的保真度或准确度的方法和相关系统的需要。

[0004] 本发明的目标通过独立权利要求的主题得以解决,其中,在从属权利要求中并入了另外的实施例。

[0005] 应当注意,本发明的以下描述的方面同等地应用于图像信号处理方法、计算机程序单元以及计算机可读介质。

[0006] 根据本发明的第一方面,提供了一种图像信号处理装置,包括:

[0007] 输入端口,其用于接收干涉测量数据,所述干涉测量数据是响应于在投射X射线射束通过要被成像的样本之后所述射束入射在探测器上而在所述探测器处探测到的,所述数据包括相衬信号和暗场信号;

[0008] 重建器,其被配置为运行图像重建算法以至少将所述暗场信号重建成暗场图像 ϵ ,其中,所述重建算法基于前向模型的,所述前向模型并入了被配置为捕获所述相衬信号到所述暗场信号中的串扰的模型分量;

[0009] 输出端口,其用于至少输出所重建的暗场图像 ϵ 。

[0010] 具体地,所述相衬信号可以是差分相衬信号。所述信号是通过允许X射线射束路径通过样本和干涉测量装置的至少两个光栅而获得的。

[0011] 由于所提出的方法专门考虑了图像信号之间的串扰,尤其是通过使用专门的(或者,在一个实施例中,明确的)串扰分量,导出的暗场图像遭受较小(或没有遭受)伪影。

[0012] 根据一个实施例,所述前向模型是根据以下的组合来形成的复合前向模型:i)针对差分相衬信号的专用前向模型,和ii)针对暗场信号的专用前向模型。该组合的形成可以涉及非线性运算,但是在备选实施例中也可以只涉及线性运算。根据一个实施例,串扰模型分量与针对所述差分相衬信号的专用前向模型的空间偏导数的绝对值成比例或所述专用前向模型的绝对值成比例。

[0013] 根据备选的实施例,并不是使复合前向模型由针对两个信号中每个的专用前向模

型组成,而是所述前向模型是针对所述相衬信号和所述暗场信号两者的公共前向模型。

[0014] 具有用于公共前向模型或复合的前向模型的选项在处理测量数据(正弦图)中提供了增加的灵活性。正弦图能够(通过合适地信号处理)被预先分析成针对两个渠道(分别是相衬和暗场)的各自的正弦图并且然后按照所提出的方法的一个实施例被处理,或者正弦图能够备选地通过使用如在本文中所提出的公共前向模型来直接处理。

[0015] 根据一个实施例,所述公共前向模型包括针对所述相衬信号的模型分量和针对所述暗场信号的模型分量,其中,所述串扰模型分量与针对所述相衬信号的所述模型分量的空间偏导数的绝对值成比例。根据一个实施例,所述重建算法是迭代的。根据一个实施例,所述迭代重建算法是由目标函数的优化驱动的。

[0016] 根据一个实施例,所述目标函数包括关于所述前向模型的余量。

[0017] 在一个实施例中,目标函数是用于两个信号的公共目标函数,并且两个信号是在一起求解的。因此考虑了两个渠道对目标函数的贡献,这继而已经被观察到以产生高保真度的图像。

[0018] 根据一个实施例,所述射束的几何形状是平行的或发散的,例如,锥形射束。如果几何形状是发散的几何形状,则前向模型可以包括校正分量。

[0019] 暗场信号是散射和来自折射的贡献的叠加。所提出的系统操作为在重建期间估计对暗场信号的非散射贡献,并且因此提供主要地(如果非唯一地)对应于实际材料散射属性的重建的经重建的暗场图像。

[0020] 针对暗场信号的各种重建算法(基于FBP的或迭代的)引起严重的伪影。针对FBP方法中的伪影的存在的原因之一是对暗场信号的折射贡献(亦即,串扰)并未像这样顺应“线积分”的常规模型假设。所提出的利用串扰建模的迭代重建提供了关于与线积分模式的这种非顺应性的方法。

附图说明

[0021] 图1示出了包括干涉光栅的X射线成像系统;

[0022] 图2示出了如由图1中的成像系统的探测器探测到的重建的衰减、相位和暗场图像以及它们各自的投影数据;

[0023] 图3在上行示出了微分相位正弦图和微分相位正弦图的导数的绝对值的图像,在下行示出了各自的重建图像;

[0024] 图4在顶行示出了暗场正弦图、微分相位正弦图和微分相位正弦图的导数的绝对值,在下行示出了各自的重建图像;

[0025] 图5示出了图像信号处理方法的流程图。

具体实施方式

[0026] 参考图1,示出了包括干涉仪装备的X射线成像系统(IM)的组件。所述成像系统可以是计算机断层摄影扫描器(CT)或(例如旋转C/U型臂类型或其他类型的)另一X射线成像模态。

[0027] 广义地,从X射线源XR发出的X射线辐射经过检查区域并且然后入射在探测器D上。

[0028] 在检查区域中驻留有要被成像的目标PB。X射线射束当波动光学地看它时,定义传

播通过检查区域的电磁波并且与要被成像的样本PB中的物质相互作用。

[0029] 在CT中,至少X射线源XR被安装在可旋转机架上以将X射线波沿着多个投影方向投影通过样本PB。

[0030] 波与物质的相互作用引起波被改变。这种改变一方面包括衰减,这是在传统X射线成像中通常所研究的。衰减是波被吸收和康普顿散射的结果。另一改变涉及当波经过物质时波的相位改变。这种波改变能够通过波前的方向的变化来理解。最后,并且在本文中主要感兴趣的是,波也经受另一类型的散射,通常被称为小角度散射。其是人们在暗场成像中想要成像的散射的类型,在所述暗场成像中,对比度对应于局部小角度散射的量。小角度散射被假设是由波与样本PB中的微结构的相互作用引起的。小角度散射能够被理解为当波首先经过干涉仪装备并然后经过物质时相干性的损失。波在光学方面的相干性损失能够被理解为物质对波造成的使波前弯曲或缠绕(warp)的方式的干扰。而传统的基于吸收的X射线成像研究样本中的线性衰减系数的分布,在相衬成像中,研究的是样本中的折射率的分布。在暗场成像中,人们询问样本PB中的个体体积点对波遭受的相干性损失的贡献有多少。该贡献是由被称为可见性 V 的量来测量的。更具体地,暗场成像涉及由相位光栅 G_1 创建的干涉条纹的可见性的损失。

[0031] 在CT中,人们将检查区域认为是在空间中被划分成体积元素或“体素”的部分。由于样本驻留在检查区域中,因此体素的该网格造成样本PB本身的体素化。在计算机断层摄影中,人们观看两个不同的空间:一方面是由体素组成的“图像空间”,另一方面是由在探测器处记录的投影数据组成的“投影空间”。在计算机断层摄影中,人们想要根据投影空间中的投影数据来重建,亦即计算,针对图像空间中的体素的值。这被理解为逆向问题。更具体地,并且在本文中主要感兴趣的是,暗场图像的重建实质上是根据投影数据计算针对暗场图像的每个体素的相关的感兴趣量的任务,在该情况中相关的感兴趣量为可见性 V 。重建的体素的集合表示在通过针对暗场信号的样本的各个平面中的一个或多个横截面图像(在本文中也称为暗场图像)。

[0032] 已经发现,如果在波与干涉仪装备和样本PB两者发生相互作用之后在探测器处探测到X射线波,则三种感兴趣信号中的任一种(即,衰减信号、相位信号和暗场信号)都能够根据由碰撞波引起的(一个或多个)探测器信号而恢复。

[0033] 干涉仪装备实质上是光栅系统。现在将进一步参考图1来简洁地解释示范性的干涉仪装备设置。干涉仪装备(“干涉仪”)在本文中纯粹地被解释为示范性实施例,并且也能够预期其他布置。

[0034] 干涉仪(其在非限制性实施例中为Talbot类型或Talbot-Lau类型的干涉仪)包括两个光栅 G_1 、 G_2 (Talbot类型)或更多个,优选为三个光栅 G_0 、 G_1 和 G_2 (Talbot-Lau类型)。在X射线源侧处的第一衰减光栅(“源光栅”) G_0 具有周期 p_0 以匹配并引起在X射线源XR处发出的X射线辐射波前的空间相干性。

[0035] 相位光栅 G_1 (具有周期 p_1)被放置在距X射线源的距离 d 处并且引起具有更下游的周期 p_2 的干涉图案。所述干涉图案能够由探测器D探测到。现在,当(要被成像的)样本PB被引入X射线源与探测器之间的检查区域中时,干涉图案的相位被移位。

[0036] 遗憾地,干涉图案的相位移通常太小而不能直接在空间上进行解析。大多数X射线探测器的分辨能力将不允许上述解析。因此,为了对该干涉图案相位移进行“取样”,具

有与干涉图案相同周期 p_2 的衰减光栅 G_2 被放置在距光栅 G_1 的距离 l 处。

[0037] 能够以多种不同方式来实现相位移位采样,其全部都在本文中被预期。

[0038] 例如,在一个实施例中,在探测器D与光栅中的至少一个之间产生相对运动。这在一个实施例中能够通过“相位步进”来实现,其中,致动器用于使得例如分析器光栅 G_2 横向移动通过不同的、分立的光栅位置,并且然后在每个光栅位置处测量每个像素 p_x 处的强度。“横向”运动在本文中意指沿着 z 方向(参见图1),亦即,在垂直于波XB的传播方向和光栅的“沟槽”方向的方向上的运动。相位步进方法在F.Pfeiffer等人的“Phase retrieval and differential phase-contrast imaging with low-brilliance X-ray sources”(Nature Phys.Lett 2,第258-261页,2006年)中得以描述。为了得到准确的结果,比如如Pfeiffer参考文献中所解释地仔细调节光栅之间距离 d 、 l (“Talbot距离”)。

[0039] 在其他实施例中,其他光栅中的一些(G_0 或 G_1)相对于 G_2 被移动和/或样本本身被移动。其他选项包括引起X射线源中的焦点移位。

[0040] 无论使用的采样方法如何,结果通常都是那样,每个像素处的强度 I 将被发现进行振荡以形成针对该探测器-像素路径的局部强度曲线。换言之,在分析器光栅 G_2 的运动期间每个像素根据时间(或者更好地根据不同的光栅位置)记录(在各个像素处的)不同强度的时间系列。如之前所提及的,每个像素 p_x 处的该振荡强度信号 I 除其他量外还“编码”相位移位(或折射)以及暗场信号(或可见性)。

[0041] 如果X射线成像是CT扫描器类型的,则针对每个像素的强度信号将是根据不同的投影方向而记录的。

[0042] 按每个像素(并且在CT中是按每个投影方向)记录的强度的集合在本文中将被称为干涉投影原始数据或“公共”正弦图 m 。

[0043] 公共正弦图是从探测器输出电子器件转发到包括重建器模块RECON的信号处理链SPS的。

[0044] 重建器模块RECON操作为将来自多个方向的强度信号重建到样本的横截面图像中。

[0045] 在一个实施例中,但不必在所有实施例中,信号处理链包括插入在探测器D与重建器RECON之间的分析器模块SP。分析器模块SP,例如傅里叶分析器(优选被布置为快速傅里叶变换器FFT),操作为将公共正弦图 m 分解成两个或三个单独的正弦图,每个正弦图针对感兴趣图像信号通道中的每个。具体地,分析器模块SP将公共正弦图分成相衬正弦图 m_s 和暗场正弦图 m_e 。对每个像素的振荡强度到两个或三个信号/正弦图(衰减信号是第三分量)中的该分析已经在其他地方进行了充分的描述,例如在M Bech等人的“Quantitative X-ray dark-field computed tomography”(Phys.Med.Biol.55,第5529-5539页,2010年)中的第5531页上的公式(1)和(4),在此通过引用将其整体并入。简明地,针对相位信号和暗场信号(可见度)的正弦图能够根据如由各自的探测器像素探测到的各自的强度 I 振荡的零阶分量和一阶分量来计算。换言之,傅里叶分析器SP按像素和投影方向在公共正弦图上操作各强度信号,以实现到两个专用正弦图 m_s 和 m_e 的分解。

[0046] 因此,取决于实施例,重建器RECON接收公共正弦图并具体根据公共正弦图重建暗场图像,或者,在另一实施例中,重建器接收至少两个正弦图 m_s 和 m_e ,并且在一个实施例中如在本文中所提出地使用两者来重建特别是暗场图像。合适的可视化/绘制模块然后能够操

作为将各自的横截面重建可视化在监视器或显示器MT上。

[0047] 在本文中提出了使用迭代重建方案,并且所提出的方法包括用于驱动迭代的新的目标函数。具体地,所述目标函数的优化流程产生更新函数,利用所述更新函数,能够迭代地更新针对重建图像的初始推测,以便达到各自的图像。应当理解,尽管这里的主要焦点在于暗场图像,但是重建总是包括其他两个信号中的至少一个(在许多情况下为两个)的估计结果以及尤其是相衬图像。事实上,根据一个实施例,提出了一种公共目标函数,其联合了来自那些通道中的两个(即,来自相衬通道和暗场图像通道)的信息。

[0048] 我们的方法中的一个关键点是要估计在重建期间对暗场信号的非散射重建,并且因此提供重建散射图像,所述重建散射图像完全是(如果不是完全地则至少大部分是)样本PB中的材料散射性质的重建。已经观察到,根据所提出的方法的重建数据的准确度和保真度优于暗场图像信号的先前重建。这些重建被频繁地发现因伪影而令人迷惑。

[0049] 在对所提出的重建器提供进一步的细节之前,参考以下附图2-4,其中,我们检查暗场图像和它们的正弦图相位的某些视觉性质以更好地促进所提出的算法。

[0050] 也已经报道了例如由目标的边缘引起的X射线波前的快速改变能够引起暗场信号响应。换言之,存在从相衬信号到暗场信号中的特定串扰。

[0051] 图2示出了针对体模扫描的三种信号,即,列A中的衰减、列B中的相位(即,折射率)以及列C中的暗场信号。顶行示出了正弦图,底行示出了重建图像。显然,暗场信号并未形成一致的正弦图(因为只有目标的边缘的迹线是可见的),导致纯边缘图像,其并不表示任何目标的局部散射性质,这是因为负散射将造成相干的增加。

[0052] 图3和图4示出了一些图像实验来图示对散射信号的“边缘贡献”实际上是能够根据差分相衬信号来估计的。

[0053] 更具体地,图3中的上行再次示出了差分相衬正弦图A(与图2中的相同)和其导数的绝对值B)。从这些附图中能够看出,边缘正弦图在定性方面非常类似于暗场正弦图(列C),图2中的右上部分,并且该边缘正弦图的滤波反投影(FBP)看起来几乎完全类似于重建散射图像,参见图3的底行的C和D。

[0054] 图4中给出了更详细地、现实生活的范例,其中,示出了来自小鼠扫描的图像数据。列A、B、C中的上部方框分别是暗场正弦图、微分相位正弦图和通过求微分从差分相衬正弦图(B)导出的“边缘”。跨各自的列A-C的底部行示出了(通过FBP获得的)各自的断层摄影重建。暗场图像与重建相位图像的视觉比较再次确认许多图像特征与相衬图像中的边缘相符。事实上,暗场图像的许多特征也能够通过采取在FBP重建之后的其导数的绝对值由从差分相衬正弦图导出的边缘图像良好地再现。然而,在暗场图像中存在某些特征(由图4的左下部中的列A的较低方框中的箭头、虚线椭圆和圆圈指示),其在边缘图像中不可见,并且因此能够归于小鼠的局部散射性质。

[0055] 已经发现先前报道的重建暗场影像中的伪影至少部分地与串扰的量有关,这样的串扰的量并不将其本身给予人们在进行断层摄影重建时通常假定的常见的线积分模型。所述线积分模型假定探测到的投影数据对应于沿着特定路径的感兴趣量的累积,所述特定路径是线积分的路径。尽管线积分模型假设对于衰减信号和相衬信号是有效的,但是对于暗场信号中的串扰诱发的相位信号来说,情形是不同的,这是因为该串扰信号并不能被表示为沿着所考虑的投影路径进行累积。然而,经由所提出的迭代重建方法,已经发现了能够合

适表达暗场图像信号的公式,这是因为不再要求用于暗场信号的线积分假设。

[0056] 参考图5,现在更加详细地解释重建器RECON的操作。

[0057] 在优选实施例中,重建器实施迭代重建算法。迭代重建基于前向模型函数或者简单地称为前向模型。在线性设置中,前向模型减少到熟悉的实施几何前向投影的系统矩阵,实质上是沿着线积分的然后被映射到投影空间中的各自的像素位置上的体素值的加和。但是在本文中提出的重建算法并不局限于线性前向问题,也能够有益地用于非线性前向问题。

[0058] 如在之前简要提到地,前向模型解释了被给出图像空间中的感兴趣量的特定分布的投影空间中的元素。前向模型是针对迭代重建算法的主要分量。在概念上,前向模型允许形成所谓的余量,所述余量测量实际测量的投影数据(亦即,正弦图)与由前向模型预测的“合成”投影数据之间的偏差。然后能够关于余量对目标函数进行设置。重建然后旨在优化所述目标函数以找到“最优”图像,所述“最优”图像最佳地解释或“拟合”在所选取的前向模型下的正弦图。在一个实施例中,可以取决于环境而将目标函数表达为代价函数或效用函数。然后,优化要么1)找到用于代价函数的最小化器,要么2)知道找到用于效用函数的最大化器。在下文中,将例如仅关于要被最小化的代价函数解释迭代重建之下的优化。然而,这并不能被解释为限制在本文中所描述的方法,这是因为数值考虑可以要求将优化问题从代价函数重新构成为效用函数,并且因此最小化问题变成最大化问题之一。

[0059] 一种方法是设置用于两个图像(亦即,相位图像和暗场图像)信号的前向模型,其可以被如下地被表示:

$$[0060] \quad m_s = \partial_r A \delta \quad m_e = A \varepsilon \quad (1)$$

[0061] 其中,A(“系统矩阵”)是几何前向投影算子(也被使用在常规的迭代CT重建中)。A中的每个条目将体素k对测得的线积分i的贡献表示为几何射线与体素的交汇长度(如果使用其他基函数而不是体素,例如,团,则线积分沿着射线通过基函数)。微分算子 ∂_r 指示径向方向的偏导数(示出为图1中的z)。(1)中的射束几何结构可以被假定为是平行的,但是我们将对此进行泛化,以下进行详细论述。

[0062] 在数学上,如以上依照图2-4中的示范性影像所讨论的观察到的影响为散射图像与相位图像之间的串扰。然后在本文中提出了通过将合适的模型分量的串扰包括到迭代重建流程中来考虑该串扰。

[0063] 从(1)明显看出,针对以下实施例,假定通过先前体积的信号傅里叶分析器或其他合适的信号解析器或分析器的运算,在探测器处记录的强度已经被分成或者已经被解析成两个正弦图,分别为相衬正弦图 m_s 和暗场正弦图 m_e 。对于通道中的每个,然后能够按照公式1中的左手侧或右手侧构成前向投影器A。不同于先前的方法,本文现在提出按照以下公式(或其数学等价形式)合并或组合暗场信号前向投影器与相衬信号前向投影器:

$$[0064] \quad m_s = \partial_r A \delta \quad m_e = A \varepsilon + \alpha \left| \partial_r^2 A \delta \right| \quad (2)$$

[0065] 具体地,合并或组合相衬前向投影器与暗场前向投影器,以形成用于暗场图像信号 m_e 的复合前向模型((2)中右侧的公式),以便获悉相位图像中的边缘对测得的暗场投影数据 m_e 的信号贡献。又换句话说,提出了将相衬信号与暗场信号相混合。从以下意义上用于暗场信号的前向模型包括复合前向模型:所述复合前向模型是通过相位图像和暗场图像的

前向模型的线性或非线性组合而形成的。在公式(2)的实施例中,形成复合包括相加以及取相位信号的前向模型的径向偏导数。其他组合也可以是合适的,并且在本文中预期其他组合。取导数得到模型分量 $\alpha|\partial_r^2 A\delta|$,其被配置为捕获来自相位信号的串扰。换言之,相关平面中的体素被前向投影到投影空间中作为线积分,并且所述线积分然后沿着当前径向方向 r (被视为图1中的 z)被求微分两次。在公式(2)的实施例中,形成复合包括取径向方向上的第二偏导数,亦即,垂直于光栅的沟槽延伸的方向的方向上第二偏导数。这对应于图1中的方向 z 。当然, r 将随着投影方向而改变,因此,在正弦图上的每行中, r 一般是不同的。串扰模型分量的结构可以被理解如下:第一偏导数 ∂_r 对应于用于相位变化(亦即,波前的传播方向的变化)的建模方法。第二偏导数然后对应于波前的曲率的变化。换言之,以“双重微分”的形式对相衬(“边缘”信号)到暗场信号中的贡献进行建模。

[0066] 在模型(2)中, A 指代如之前在(1)处引入的系统矩阵或几何前向投影算子。尽管 A 本身是线性的,但是复合前向投影模型((2)中右边的公式)本身是非线性的,这是因为绝对值算子 $|\cdot|$ 是非线性的。再一次地, A 可以被配置用于平行射束,并且可以被配置用于发散射束(例如,扇形或锥形),以下对其进行更多的描述。

[0067] 然后,能够在一个实施例中通过驱动重建,尤其是通过将代价函数(或其数学等价形式)最小化来获得所提出的迭代重建:

$$[0068] \quad \Delta = |W_\delta(m_\delta - \partial_r A\delta)|^2 + |W_\varepsilon(m_\varepsilon - A\varepsilon - \alpha|\partial_r^2 A\delta|)|^2 + R(\delta, \varepsilon) \quad (3)$$

[0069] 其中, W_δ 和 W_ε 是加权参数,例如,但不是必要的,统计加权矩阵(假设为用于测量的统计模型)并且在一个实施例中,存在针对图像 δ 和 ε 的正则化子和惩罚器项 R 。参数 α 指代经验性(或者解析地导出的)标度因子。

[0070] 能够例如使用标准非线性共轭梯度算法或任何其他合适的优化方法(例如,扩展拉格朗日方法或迭代坐标下降等)来执行作为体素图像 δ 和 ε 的函数的(3)的优化。

[0071] 代价函数是关于针对两个信号通道(相位和暗场)的余量而被表示的,其中,使用具有串扰分量的新的复合前向模型来形成针对暗场信号的余量。对来自两个通道的余量求平方和,组成单个目标函数或代价函数 Δ ,因此在每个迭代步骤中一起重建两幅图像 ε 、 δ 。

[0072] 在一个实施例中,应用用于将代价函数 Δ 最小化的合适的数值技术(例如,共轭梯度算法)然后得到迭代表达式,其定义用于迭代重建的更新函数。使用用于暗场图像的初始推测(其可以简单地将每个体素设定为零),人们然后能够使用更新函数通过迭代来保持更新。在一个实施例中,人们然后重复地评价代价函数(不必针对每次迭代)以核查代价 Δ 是否降到阈值以下。如果降到阈值以下,则迭代中止且将最后的图像输出为暗场图像。在其他实施例中,存在固定的、预定义阈值数量的迭代,并且一旦达到该阈值则终止迭代重建。在某些环境中,相衬图像也是感兴趣的,其也可以被输出,这是因为两幅图像被一起重建。

[0073] 然后可以以图5的流程图的方式将新的迭代重建算法概括如下。

[0074] 一般,在步骤S505处,接收干涉投影数据。干涉投影数据在探测器处以不同的查看角度被探测到,并且在信号处理之后被记录为用于两个信号通道(相衬 m_ε 和暗场 m_δ)的两个正弦图 m_ε 和 m_δ 。

[0075] 在步骤S510处,然后基于测得的正弦图和按照公式(3)的目标函数或其数学等价

形式来执行迭代重建算法。

[0076] 在(如由诸如评价代价函数的预定义的中止准则所建立的)足够数量的迭代之后,在步骤S515处输出在所考虑的扫描位置处的重建的横截面暗场。另外,也可以输出或存储相衬图像以用于另外的参考。

[0077] 应当理解,以上定义的步骤得到针对一个扫描位置的横截面图像,并且以上提及的步骤将需要针对不同的扫描位置进行重复以获得整个体积。

[0078] 按照公式(4),权重 w 可以不必具有如在本文中预期的统计意义,但是可以从建模的角度被简单地选取为定义针对总代价 Δ 的相对多数的各个渠道的权重。

[0079] 但是,当使用统计方法时,有时被称为统计迭代重建,权重可以被选取为表示测量不确定度,亦即,各自的探测器像素 px 处的方差和标准偏差。统计权重 w 的形式是所选取的用于测量的统计模型的函数。具体地,可以假定为泊松分布。在该统计环境中,目标函数能够被理解为(负)最大似然函数。这是例如在T.Koehler等人的“Iterative reconstruction for differential phase contrast imaging”(第4542-4545页,Med.Phys.,38(8),2011年8月)中所描述的最大似然(ML)方法。参见例如公式(3)的左列,第4543页。在此通过引用将这段文字整体并入。

[0080] 在优选实施例中,无论是否是统计学的,使用体素值在基函数方面的扩展。在该基函数方法中,每个体素被认为是基函数的线性组合(有时也被称为与2D凯撒贝塞尔函数家族有关的“团”)。该方法的细节能够在T.Koehler等人的“Iterative reconstruction for differential phase contrast imaging”(第4542-4545页,Med.Phys.,38(8),2011年8月)中找到。换言之,在特定体素处的每个值能够被认为是由基函数和对应的标量形成的权重的线性组合。迭代重建然后变成找到各自的线性组合的最优标量分量的练习。这具有以下优点:即,不需要使用按照公式(2)、(3)的导数 ∂_r 的有限差分逼近。在基函数方法中能够避免通过有限差分的逼近,这是因为基函数的导数的投影能够被确切地计算,这是因为基函数被选取为能以解析方式进行微分。换言之,取导数量以形成预定义的分析表达式而不是使用通过有限差分的逼近。

[0081] 现在转到不同的实施例,按照以下公式(或其数学等价形式)来设置公共前向模型:

$$[0082] \quad I_i = I_{0i} e^{-\int_{l_i} \mu(x) dx} \left[1 + V_{0i} e^{-\int_{l_i} \varepsilon(x) dx - \alpha \left| \partial_z^2 \int_{l_i} \delta(x) dx \right|} \cdot \cos \left(\varphi_{0i} + \partial_z \int_{l_i} \delta(x) dx \right) \right] \quad (4)$$

[0083] 其中:

[0084] I_i : 针对在相位步骤 i 处沿着线 l_i 通过目标的测量的强度的模型

[0085] I_{0i} : 在没有沿着线 l_i 的目标的情况下的测量的强度

[0086] V_{0i} : 沿着线 l_i 的可见性

[0087] φ_{0i} : 沿着线 l_i 的初始相位

[0088] $\mu(x)$: 目标的吸收

[0089] $\varepsilon(x)$: 目标的小角度散射

[0090] $\delta(x)$: 目标的折射率

[0091] z : 垂直于光栅的方向

[0092] x :沿着线 l_i 的位置

[0093] 在该前向模型中,不必将记录的强度分成暗场正弦图 m_ε 和相衬正弦图 m_δ 。换言之,根据该实施例,由公共正弦图 m 形成输入,其中,每个输入包括在相位步进中在探测器处记录的各自的时间系列。

[0094] 按照公式(4)的信号模型形成与先前的实施例相比的用于公共正弦图的公共前向模型,其中,按照公式(2),存在用于对应于(2)中的左边公式和右边公式的两个通道(相位和暗场)的专用前向模型。公共前向模型仍然包括用于两个信号的模型分量,即,针对相位信号的模型分量 $\partial_z \int_{l_i} \delta(x) dx$ 和针对暗场的模型分量 $e^{-\int_{l_i} \varepsilon(x) dx}$ 。仅在外观上类似于以上公式(4)前向模型已经在由Ritter等人的“Simultaneous maximum-likelihood reconstruction for x-ray grating based phase-contrast tomography avoiding intermediate phase retrieval”中进行了报道,参见Ritter中第2页的公式(3)。然而,最关键地并且非常不同于Ritter,如在先前实施例中的公式(4)中的前向模型包括这样的模型分量,所述模型分量按照以下公式来捕获从相位信号到暗场信号中的串扰:

$$[0095] \quad \alpha \left| \partial_z^2 \int_{l_i} \delta(x) dx \right| \quad (5)$$

[0096] 其中,针对暗场信号的模型分量与按照公式(4)的所述串扰分量(5)进行组合。回到按照先前的实施例(2)的系统矩阵方法,可能有益的是利用公共模型信号模型(4)来对结构类比进行绘图。 A 行(或取决于惯例,列)对应于(中间)相位信号模型分量 $\int_{l_i} \delta(x) dx$ 的数值离散化。

[0097] 用于该非线性前向模型的代价函数然后能够类似于公式(4)按照以下公式(或其数学等价形式)被公式化:

$$[0098] \quad \Delta(\mu, \varepsilon, \delta) = \sum_i w_i (I_i(\mu, \varepsilon, \delta) - m_i)^2 + \beta R(\mu, \varepsilon, \delta) \quad (6)$$

[0099] 其中, w_i 是针对强度测量结果的(例如根据测量信号遵从泊松分布的假设而导出的)估计的加权因子,并且其中, m_i 是每个相位步骤 i 的所测量的强度(或光子计数,取决于探测器类型)。

[0100] 换言之,在该实施例中,在步骤S505处,接收包括针对各自的投影方向的各自的强度系列的公共正弦图而不是两个专用正弦图。

[0101] 剩余的步骤S510和S515类似于之前解释的实施例:代价函数再次关于余量被公式化,但是这时关心公共前向模型和在没有通过信号分析器SA进行预处理的情况下记录的强度 m_i 。如在具有按照公式(2)的专用前向模型的先前实施例的公式(3)中,公式(6)定义最优化问题,特别是针对找到最小值 $(\mu, \varepsilon, \delta)$ 的优化问题。优化问题的解决方案然后具体产生暗场图像 ε 。

[0102] 用于代价函数(6)的合适的迭代数值优化算法(例如,共轭梯度方法或以上提及的其他方法)可以用于达到更新函数。该更新函数然后定义具体用于暗场图像 ε 问题(但是也用于其他两幅图像 μ, δ ,如通常与暗场图像 ε 一起解析的那样)的迭代重建算法。

[0103] 正如先前的实施例(3),人们可以选取诸如ML的统计方法。具体地, w_i 能够被选取为假定潜在的统计分布(例如,用于测得的数据的泊松或高斯)的统计权重。

[0104] 针对特定扫描位置和像素位置构成公式(6)处的代价函数,其中,指标*i*跨越不同的相位步骤*i*在用于所述像素的不同强度测量上延伸。将需要针对所有感兴趣扫描位置求解对应的优化问题以覆盖整个感兴趣体积。

[0105] 在针对前向模型(2)、(4)的两个实施例中的任一个中,正则化或惩罚器项R可以用于加强特定的可期望行为,例如,解的平滑性。例如,在一个实施例中,使用吉洪诺夫正则化子,但是在本文中预期其他正则化子R。在实施例中,存在因子β以调节正则化子项的响应。

[0106] 在如针对第一实施例之前描述的第二实施例中,再次使用基函数来改进所提出的方法的准确度,以便以分析方式表达导数而不是不得不通过有限差分来逼近导数。

[0107] 应当意识到,在两个实施例中,前向投影算子是非线性的。然而,也预期其中前向投影器是线性的其他实施例。

[0108] 现在回到射束几何形状,在以上实施例中的一些中,假设射束几何形状是平行的。对于发散的几何形状,例如,锥形射束或扇形射束,施加例如在申请人的WO 2013/171657中所描述的校正。该校正被施加到前向模型。在具有用于相位信号和暗场信号的各自的专用前向模型的实施例(2)中,预期在优选实施例中将发散的射束几何形状校正仅施加到专用于暗场信号的前向模型(亦即,施加到(2)中右边的公式),当然,该额外的建模涉及暗场信号对系统的放大率的特殊依赖性。参见例如按照在以上引用的参考文献WO 2013/171657中的公式(7)的校正项 $d=a/M$ 。当然,在用于两个信号的前向模型的构成中仍然需要考虑当从平行射束移动到发散射束时几何形状的轻微的几何形状改变,使得系统矩阵A的行仍然提供对应的线积分的数值实施方式。在其他实施例中,校正可以被施加到两个专用模型。

[0109] 关于公共前向模型(4),可以施加以下修改以用于发散射束几何形状:

$$[0110] \quad I_i = I_{0i} e^{-\int_{l_i} \mu(x) dx} \left[1 + V_{0i} e^{-\int_{l_i} \frac{x}{L} \varepsilon(x) dx - \alpha \left| \frac{\partial^2}{\partial z^2} \int_{l_i} \delta(x) dx \right|} \cdot \cos \left(\varphi_{0i} + \frac{\partial}{\partial z} \int_{l_i} \delta(x) dx \right) \right] \quad (7)$$

[0111] 在按照(6)的建模方法中,与实施例(5)(其中假设平行射束几何形状)的唯一的差异在于在用于暗场信号的建模分量中包括额外的加权因子 x/L 。这归因于散射,其中,L(在图1中被示为d)是从源到相位光栅的距离。注意,这种加权“打破”了通常的线积分的对称性,因此,需要沿着线 l_i 与传统的线积分相反地从源到探测器(或者反之,从探测器到源,在这种情况下,加权被取为 $(L-x)/L$)执行积分,在所述传统的线积分中,线积分的值独立于积分的方向。

[0112] 重建器RECON可以被运行在通用计算机上,所述通用计算机充当用于成像系统的操作者控制台(未示出)或者充当用于图像审查的工作站。在另一实施例中,重建器被布置为专用模块,具体为专用可编程芯片(例如,FGPA芯片)或者可以被实施为硬接线芯片。

[0113] 在本发明的另一示范性实施例中,计算机程序或计算机程序单元被提供为通过适于在适当的系统上运行根据前述实施例中的任一个所述的方法的方法步骤来表征。

[0114] 因此,计算机程序单元可以被存储在计算机单元中,所述计算机程序单元也可以是本发明的实施例的部分。该计算单元可以适于执行或引起对上述方法的步骤的执行。此外,该计算单元可以适于操作上述装置的分量。该计算单元能够适于自动操作和/或运行用户的命令。计算机程序可以被加载到数据处理器的的工作存储器中。因此,可以装备数据处理

器来执行本发明的方法。

[0115] 本发明的该示范性实施例覆盖从一开始就使用本发明的计算机程序,以及借助于更新将现有程序转换为使用本发明的程序的计算机程序二者。

[0116] 更进一步地,计算机程序单元可以能够提供所有必要步骤以完成如上所述的方法的示范性实施例的流程。

[0117] 根据本发明另外的示范性实施例,提出了一种计算机可读介质,例如CD-ROM,其中,该计算机可读介质具有被存储于其上的计算机程序单元,所述计算机程序单元由前面的部分所描述。

[0118] 计算机程序可以被存储和/或被分布在合适的介质上,例如,与其他硬件一起或作为其他硬件的部分供应的光学存储介质或固态介质,但是也可以以其他形式被分布,例如,经由互联网或其他有线或无线的电信系统被分布。

[0119] 然而,计算机程序也可以被呈现在网络上,如万维网,并且能够从这样的网络被下载到数据处理器的存储器中。根据本发明的另外的示范性实施例,提供了用于使计算机程序单元可用于下载的介质,所述计算机程序单元被布置为执行根据本发明的先前描述的实施例中的一个所述的方法。

[0120] 必须指出,本发明的实施例是参考不同主题来描述的。具体地,一些实施例是参考方法型权利要求来描述的,而其他实施例是参考装置型权利要求来描述的。然而,除非另行指出,本领域技术人员将从以上和以下的描述中推断出,除了属于一种类型的主题的特征的任意组合之外,涉及不同主题的特征之间的任意组合也被认为在本申请中被公开。然而,所有的特征都能够被组合来提供多于特征的简单加合的协同效应。

[0121] 尽管已经在附图和前面的描述中详细图示和描述了本发明,但是这样的图示和描述应当被认为是说明性或示范性的,而非限制性的;本发明不限于所公开的实施例。本领域技术人员通过研究附图、公开内容以及权利要求,在实践请求保护的发明时能够理解并实现对所公开的实施例的其他变型。

[0122] 在权利要求中,“包括”一词不排除其他元件或步骤,并且词语“一”或“一个”不排除多个。单个处理器或其他单元可以实现在权利要求中记载的若干项的功能。尽管在互不相同的从属权利要求中记载了特定措施,但是这并不指示不能有利地使用这些措施的组合。权利要求中的任何附图标记都不应被解释为对范围的限制。

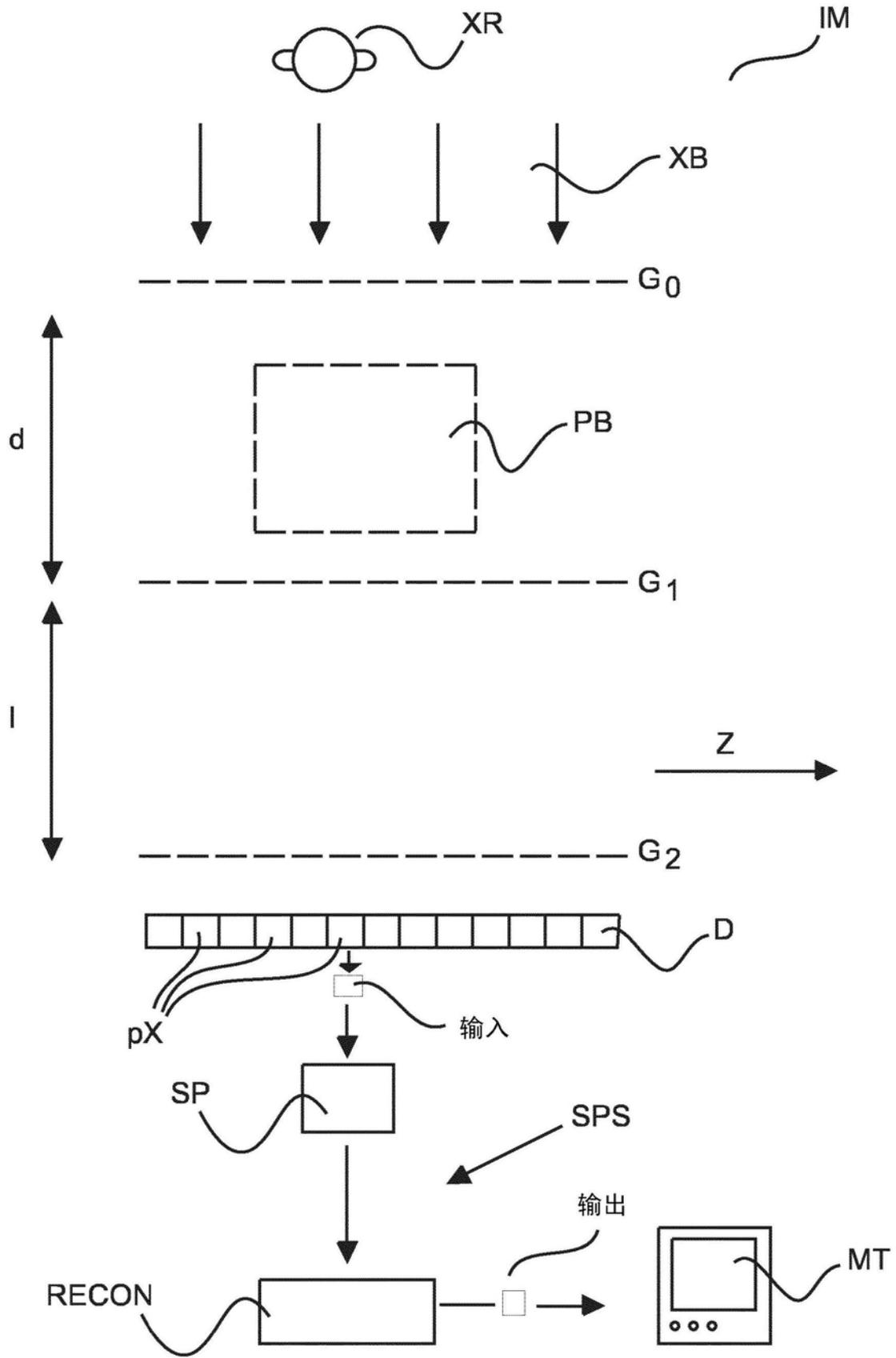
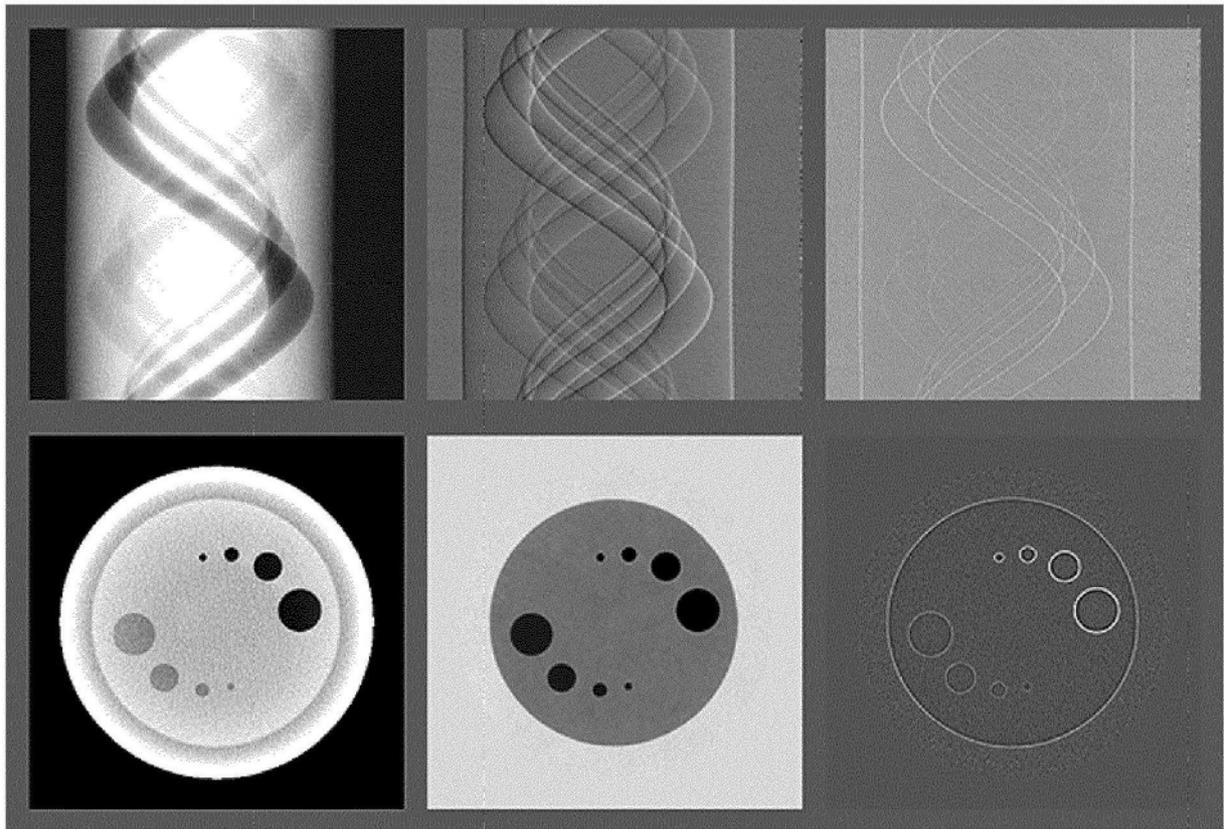


图1



A

B

C

图2

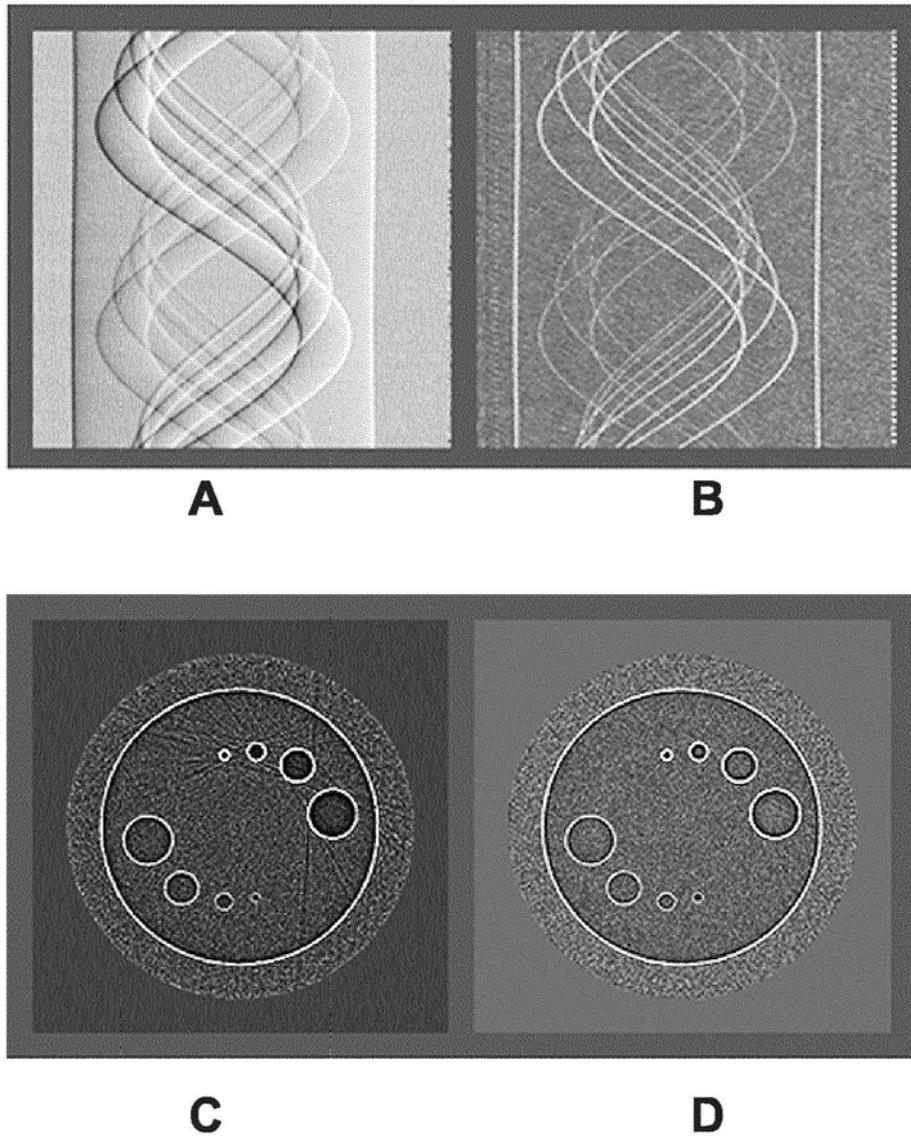


图3

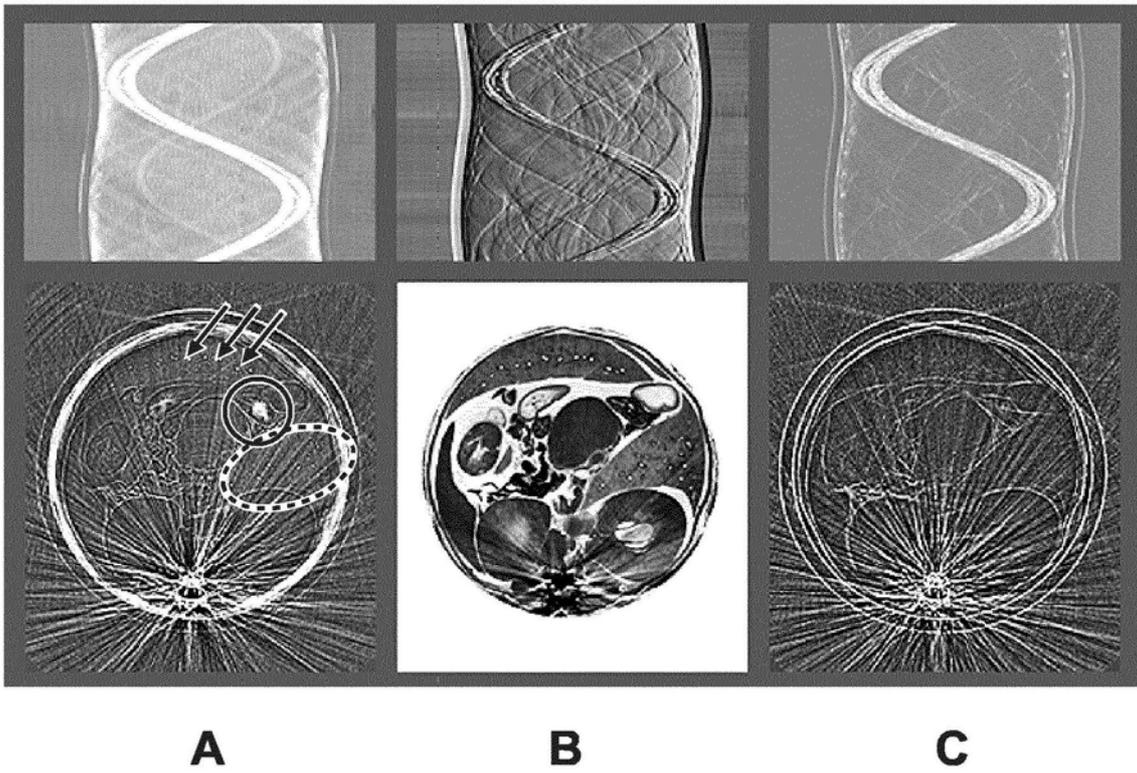


图4

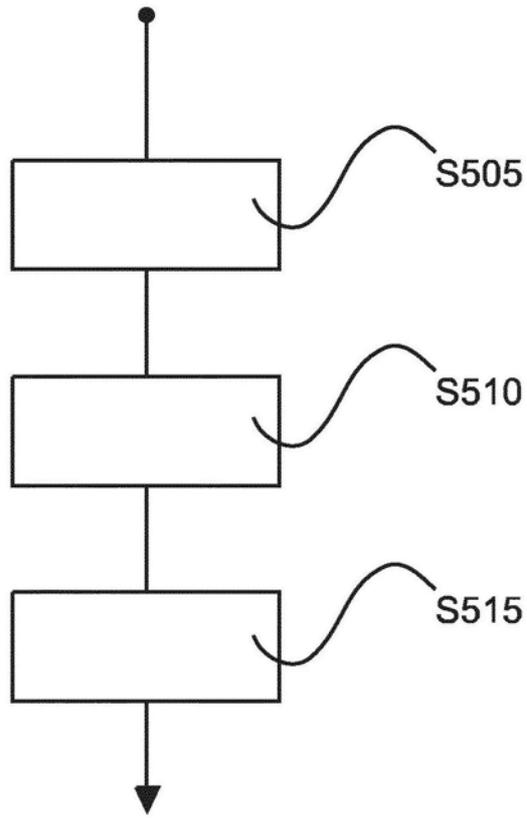


图5